



jc511 U.S. PTO

09/514040



Bescheinigung

Die Firma Carl Zeiss in Heidenheim an Brenz/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Beleuchtungssystem mit Feldspiegeln zur Erzielung einer gleichförmigen Scanenergie"

am 26. Februar 1999 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig die Symbole G 03 F und G 02 B der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 2. Dezember 1999

Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Zeichen: 199 08 526.9

Wassmaier

Beleuchtungssystem mit Feldspiegeln zur Erzielung einer gleichförmigen Scanenergie

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem, insbesondere für die
5 Lithographie mit Wellenlängen von 193 nm oder weniger als 193 nm bis in
den EUV-Bereich mit ausgeleuchtetem Schlitz, umfassend eine Lichtquelle,
wenigstens einen Feldspiegel oder eine Feldlinse, des weiteren eine EUV-
Projektionsbelichtungsanlage sowie ein Verfahren zur Korrektur der
Scanenergie in einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage.

Um die Strukturbreiten für elektronische Bauteile noch weiter reduzieren zu
können, insbesondere in den Submikron-Bereich, ist es erforderlich, die
Wellenlänge des für die Mikrolithographie eingesetzten Lichtes zu verringern.
Denkbar ist bei Wellenlängen kleiner als 193 nm beispielsweise die
15 Lithographie mit weichen Röntgenstrahlen. Aus der US-A-5,339,346 ist eine
Anordnung zur Belichtung eines Wafers mit derartigen Strahlen bekannt
geworden. In der US-A-5,737,137 ist ein Beleuchtungssystem für weiche
Röntgenstrahlen, sogenannte EUV-Strahlen, gezeigt, bei dem mit Hilfe von
drei sphärischen Spiegeln eine Ausleuchtung einer zu belichtenden Maske
bzw. eines Retikels erzielt wird.

Als Beleuchtungssysteme, die diesen Anforderungen in besonderer Art und
Weise genügen, haben sich Beleuchtungssysteme herausgestellt, die die
20 oberbegrifflichen Merkmale von Anspruch 1 aufweisen.

Problem der zuvor genannten EUV-Belichtungssysteme bei der Ausleuchtung
eines Schlitzes, insbesondere eines gebogenen Schlitzes ist, die Scan-
Uniformity. Beispielsweise kann die Scanenergie trotz statisch homogener
Beleuchtung aufgrund des längeren Scanweges zum Feldrand hin ansteigen.
30 Die Scan-Energie und damit die Scan-Uniformity kann aber auch anderweitig
beeinflusst werden, beispielsweise sind Schichteinflüsse möglich.

Beispielsweise beträgt der Anstieg eines typischen Ringfeld mit mittlerem Radius $R = 100 \text{ mm}$ und einem Winkelbereich von $\alpha = 60^\circ$ eines Ringfeldscanners 15 %. Aufgabe der Erfindung ist es, ein Beleuchtungssystem anzugeben, bei dem die Scanenergie, die sich als Linienintegral über die Intensitätsverteilung in der Waferebene entlang des Scanweges ergibt, uniform ist, bzw. so gesteuert werden kann.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß bei einem Beleuchtungssystem der oberbegrifflichen Art der bzw. die Feldspiegel oder die Feldlinse(n) derart geformt sind, daß das ausgeleuchtete Feld in der Retikelebene senkrecht zur Scan-Richtung verzeichnet ist.

Feldspiegel, die eine gute Gleichmäßigkeit der Leistung des Belichtungsstrahls in einer Lithographieanordnung am Wafer aufweisen, sind aus der US 5142561 bekannt geworden. Allerdings betreffen die dort beschriebenen Belichtungsanordnungen die Kontaktbelichtung eines Wafers durch eine Maske hindurch mit Röntgenstrahlen einer Energie von 800 bis 1800 eV und somit andere Beleuchtungssysteme wie das der Erfindung.

In einer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß das Beleuchtungssystem optische Komponenten zur Transformation der Lichtquelle(n) in sekundäre Lichtquellen umfaßt. Bevorzugt können hierfür Spiegel mit Rasterelementen beispielsweise Feldwaben verwandt werden.

Besonders bevorzugt ist es, wenn in der Ebene der sekundären Lichtquellen ein weiterer Spiegel angeordnet ist und ein derartiges System als System mit verkettetem Strahlengang ausgeführt wird.

Die Erfindung ist generell für sämtliche Beleuchtungssysteme verwendbar, insbesondere aber für EUV-Beleuchtungssysteme, die eine reelle oder virtuelle Ebene mit sekundären Lichtquellen bzw. einer Blendenebene aufweisen.

In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß mittels der zunehmenden Verzeichnung die statische Beleuchtungsintensität im gebogenen Schlitz azimuthal abnimmt.

5 Besonders bevorzugt werden die Feldspiegel derart ausgestaltet, daß eine Uniformität der Scanenergie in der Retikelebene im Bereich $100 \pm 7 \%$, bevorzugt $100 \pm 5 \%$, besonders bevorzugt $100 \pm 3 \%$ erreicht wird.

Der bzw. die Feldspiegel haben neben der Verzeichnung der Abbildung, d.h. der Steuerung der Intensitätsverteilung noch die Aufgaben der Ringformung sowie Herstellen der Telezentrie.

15 Unter Telezentrie wird in der vorliegenden Anmeldung verstanden, daß das Gesamtsystem am Wafer telezentrisch ist. Dies erfordert eine Anpassung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems an die Eintrittspupille des Objektives, die für ein reflektives Retikel im Endlichen liegt.

20 In der vorliegenden Anmeldung ist die Telezentrieanforderung dann erfüllt, wenn die Abweichung der Schwerstrahlen von Beleuchtung und Objektiv in der Retikelebene ein bestimmtes Maß, beispielsweise $\pm 4,0$ mrad, vorzugsweise $\pm 1,0$ mrad nicht überschreitet und die Schwerstrahlen telezentrisch auf den Wafer treffen.

25 In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform weist der bzw. die Feldspiegel Toroidform auf.

Mit toroidförmigen Spiegeln wird in einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung die für eine gleichförmige Scanenergie benötigte Verzeichnung durch Änderung der Flächenparameter, wie beispielsweise der konischen Konstanten, Radien etc. des bzw. der toroidförmigen Feldspiegel

30

senkrecht zur Scanrichtung erreicht. Besonders bevorzugt ist es, wenn hierzu nur die konischen Konstanten variiert werden müssen.

5 Um neben den statischen Einflüssen von Scanweglänge, Schichten, Absorptionen auf die Scanenergie auch dynamische Änderungen derselben wie beispielsweise Zeiteffekte oder aber auch Variationen bei unterschiedlicher Ausleuchtung der Pupille berücksichtigen und die Scanenergie korrigieren zu können, ist in einer Fortbildung der Erfindung vorgesehen, Aktuatoren an dem Feldspiegel bzw. den Feldspiegeln zur Beeinflussung der Spiegeloberfläche anzuordnen. Eine besonders einfache Anordnung ergibt sich, wenn die Aktuatoren zur Beeinflussung der Feldspiegeloberfläche parallel zur Scanrichtung bzw. y-Achse des Feldspiegels angeordnet sind, beispielsweise in Form eines Zeilen- bzw. Balkenaktuators.

15 Mit Vorteil ist vorgesehen, daß die Feldlinsen derart ausgestaltet sind, daß der Telezentriefehler aufgrund der Verzeichnung zur Erreichung einer gleichmäßigen Scanenergie höchstens ± 4.0 mrad, vorzugsweise ± 1.0 mrad in der Retikelebene beträgt.

20 Neben dem Belichtungssystem stellt die Erfindung auch eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem derartigen Belichtungssystem zur Verfügung sowie ein Verfahren zur statischen Korrektur der Scanenergie mit einem derartigen Projektionssystem wie auch der dynamischen Korrektur.

25 Die Erfindung soll nachfolgend anhand der Figuren beispielhaft beschrieben werden.

30 Es zeigen:

Fig. 1 ein typisches Ringfeld für ein EUV-Beleuchtungssystem.

Fig. 2 die Abbildung der zentralen Feldwabe eines Wabenkondensors in das Ringfeld mit Hilfe der Feldlinse.

5

Fig. 3 den Verlauf der integralen Scanenergie in der Retikelebene einer Toroidfeldlinse sowie einer gemäß der Erfindung aufgrund der Verzeichnung vorhergesagten Linse bei Betrachtung einer Feldwabe.

Fig. 4 den Verlauf der integralen Scanenergie in der Retikelebene einer Toroidfeldlinse sowie einer Feldlinse gemäß der Erfindung für den gesamten Wabenkondensor, d.h. simuliert mit allen Waben.

Fig. 5 die Pfeilhöhendifferenz am ersten Feldspiegel mit und ohne Verzeichnungskorrektur bei Variation von R_x , R_y , K_x , K_y .

15

Fig. 6 die Pfeilhöhendifferenz am zweiten Feldspiegel mit und ohne Verzeichnungskorrektur bei Variation von R_x , R_y , K_x , K_y .

Fig. 7 die Pfeilhöhendifferenz mit und ohne Verzeichnungskorrektur bei Variation nur der konischen Konstanten in x-Richtung am Feldspiegel 1.

Fig. 8 die Pfeilhöhendifferenz mit und ohne Verzeichnungskorrektur aufgrund der Variation der konischen Konstanten in x-Richtung am Feldspiegel 2.

25

Fig. 9 die Anordnung mechanischer Aktuatoren zur dynamischen Beeinflussung der Oberflächenform des Feldspiegels.

Die nachfolgend beschriebenen erfindungsgemäßen EUV-Beleuchtungssysteme arbeiten mit einem Ringfeldsegment 1 als Objekt, das

30

in die Waferenebene abgebildet wird. Die Ausdehnung des Feldes läßt sich wie in Figur 1 dargestellt beschreiben.

Gemäß Fig. 1 beträgt die Breite des Ringfeldes Δr , der mittlere Radius R_0 . Das Ringfeld überstreicht einen Winkelbereich von

$$2 \cdot \alpha_0$$

bzw. einen Bogen von

$$2 \cdot s_0.$$

Die Scanenergie $SE(x)$ ergibt sich als Linienintegral:

$$SE(x) = \int E(x,y) dy$$

wobei $E(x, y)$ die Intensitätsverteilung in der x-y-Ebene ist,

entlang der Scanrichtung, die zu diesem Ausführungsbeispiel die y-Richtung ist. Jeder Punkt auf dem Wafer enthält entsprechend seiner x-Koordinate die Scanenergie $SE(x)$. Will man eine gleichmäßige Belichtung erhalten, so ist es vorteilhaft, wenn die Scanenergie weitgehend unabhängig von x ist.

Nachfolgend soll prinzipiell beschrieben werden, wie die Scanenergie durch das Design der Feldlinse beeinflusst werden kann.

Beispielhaft hierfür wird ein Beleuchtungssystem umfassend einen ersten Spiegel mit Feldwaben zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen erläutert, ohne daß hierin eine Beschränkung zu ersehen ist. Bei einem derartigen System wird die zentrale Feldwabe (0,0) 3 mit Hilfe einer grazing incidence Feldlinse auf das Ringfeld 1 in der Retikelebene abgebildet. Die Feldlinse formt dabei das Ringfeld, bildet die Blendenebene in die Eintrittspupille des Objektivs ab und steuert die Beleuchtungsverteilung in der Retikelebene. Die Kippwinkel der anderen Feldwaben werden so eingestellt, daß die Bilder der Waben in der Retikelebene überlagert werden. Die Form der Wabenbilder wird in

ähnlicher Weise wie für die zentrale Wabe durch die Feldlinse bestimmt. Somit kann das Design der Feldlinse, die wiederum die Scanenergie beeinflusst, über die Abbildung der zentralen Feldwabe optimiert werden. Sie kann dabei als homogen leuchtende Fläche betrachtet werden. Die Homogenität ergibt sich durch die Überlagerung aller Feldwaben. Figur 2 zeigt die Abbildung der zentralen Feldwabe in das Ringfeld des Objektes.

Die x-Richtung der Wabe wird auf die Bogenlänge s in der Retikelebene, die y-Richtung auf die radiale Ausdehnung r abgebildet.

Wenn die Feldlinse aus Toroidlinsen besteht, kann man die Abbildung zerlegen in einer Abbildung β_s und β_r :

$$\beta_s: x_w \rightarrow s$$

$$\beta_r: y_w \rightarrow r$$

wobei: s : sagittale Abbildung

r : radiale Abbildung

Legt man eine homogene Intensitätsverteilung

$$E_w(x, y) = E_w^0$$

in der x, y -Ebene der Feldwabe zugrunde, so erhält man durch die Feldlinsenabbildung die Intensitätsverteilung

$$E_r(s, r).$$

in der Retikelebene. Die Indizierung r steht nachfolgend für die Retikelebene.

Ist die Abbildung verzeichnungsfrei, so ist die Intensitätsverteilung in der Retikelebene ebenfalls homogen

$$E_r(x, y) = E_r^0.$$

5

Da der Scanweg zum Feldrand hin zunimmt, wird die Scanenergie in der Retikelebene eine Funktion von x_r .

$$SE(x_r) = E_r^0 \int_{\text{Scanweg bei } x_r} dy$$

es gilt:

$$SE(x_r) = E_r^0 \int dy = E_r^0 \cdot \left(\sqrt{\left(R_0 + \frac{\Delta r}{2}\right)^2 - x_r^2} - \sqrt{\left(R_0 - \frac{\Delta r}{2}\right)^2 - x_r^2} \right)$$

15

Scanweg
bei x_r

Für $\Delta r < R_0$ und $x_r < R_0$ kann dies in erster Ordnung angenähert werden durch:

$$SE(x_r) \approx E_r^0 \int_{\text{Scanweg bei } x_r} dy = E_r^0 \cdot \frac{\Delta r}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_r}{R_0}\right)^2}}$$

20

25

Legt man die nachfolgenden beispielhaften Feldparameter

$$R_0 \pm \Delta r = (100.0 \pm 3.0) \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = 30^\circ$$

30

für das zu beleuchtende Feld in der Retikelebene zugrunde, so steigt zum Feldrand $x_r = 50.0$ mm bei homogener Intensitätsausleuchtung die Scanenergie auf

5
$$SE(x_r = 50.0) = 1.15 \cdot SE(x_r = 0.0)$$

an. Bei verzeichnungsfreier Abbildung ergibt sich somit eine Uniformity- oder Gleichmäßigkeitsfehler:

$$Uniformität [\%] = 100\% \cdot \frac{SE_{\max} - SE_{\min}}{SE_{\max} + SE_{\min}} = 7.2\%.$$

Bei

15
$$R_0 \pm \Delta r = (200.0 \pm 3.0) \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = 14,5^\circ$$

ergibt sich:

$$SE(x_r = 50.0) = 1.03 \cdot SE(x_r = 0.0).$$

Bei verzeichnungsfreier Abbildung folgt somit ein Uniformity-Fehler von

$$Uniformität [\%] = 100\% \cdot \frac{SE_{\max} - SE_{\min}}{SE_{\max} + SE_{\min}} = 1.6\%.$$

25

Für größere Radien R_0 des Feldbogens und kleinere Bogenwinkel α_0 ist der Anstieg der Scanenergie zum Feldrand wesentlich geringer.

Die Gleichmäßigkeit kann erfindungsgemäß erheblich verbessert werden, wenn man den Feldspiegel derart formt, daß die Feldlinsenabbildung in der

30

Retikelebene azimuthal verzeichnet erfolgt, d.h. man führt einen ortsabhängigen Abbildungsmaßstab $\beta_s: x_w \rightarrow s$ ein.

5

Allgemein gilt, daß die Bestrahlungsstärke E (Intensität) als Quotient aus Strahlungsfluß $d\Phi$ und Flächenelement dA , auf das der Strahlungsfluß trifft, definiert ist, somit:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Das Flächenelement ist für den Fall des Ringfeldes gegeben durch

$$A = ds \cdot dr$$

15

Liegt in azimuthaler Richtung Verzeichnung vor, so verhält sich die verzeichnete Intensität in der Retikelebene

$$E_r^V$$

20

rekziprok zum Quotienten aus verzeichnetem Bogenelement ds^V und unverzeichnetem Bogenelement $ds^{V=0}$.

$$\frac{E_r^V}{E_r^{V=0}} = \frac{dr \cdot ds^{V=0}}{dr \cdot ds^V} = \frac{1}{\frac{ds^V}{ds^{V=0}}}$$

25

Da bei unverzeichneter Abbildung

$$ds^{V=0} \propto dx_w,$$

30

gilt, folgt:

$$E_r^V \propto \frac{1}{\frac{ds^V}{dx_w}}$$

5 Durch die Variation des Quotienten (ds/dx_w) kann die Intensität

$$E_r^V(x_r)$$

in der Retikelebene beeinflusst werden.

Der Zusammenhang zwischen Scanenergie SE (x_r) und azimuthalem Abbildungsmaßstab β_s soll nachfolgend abgeleitet werden. Es ist:

$$SE(x_r) = \int_{\text{Scanweg bei } x_r} E(x_r, y_r) dy.$$

15

Die Intensität $E(x_r, y_r)$ läßt sich zerlegen in

$$E(x_r, y_r) = g(r) \cdot f(s).$$

20

Für $\Delta r < R$ und $\Delta r < x_r$ soll $g(r)$ unabhängig von x_r , $f(s)$ unabhängig von y sein.

Da s und x_r gemäß

$$\sin\left(\frac{s}{R}\right) = \frac{x_r}{R},$$

25

direkt miteinander gekoppelt sind, läßt sich $SE(x_r)$ auch als Funktion von s schreiben:

30

$$SE(s) = \int f(s) g(r) dy,$$

da $f(s)$ unabhängig von y folgt:

$$SE(s) = f(s) \cdot \int g(r) dy$$

Scanweg
bei s

5

wegen

$$\frac{dr}{dy} = \cos\left(\frac{s}{R}\right)$$

ist:

$$SE(s) = f(s) \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{s}{R}\right)} \cdot \int_{-\Delta r}^{+\Delta r} g(r) dr$$

15

Da

$$f(s) \propto \frac{1}{\frac{ds}{dx_w}}$$

20

und

$$\int_{+\Delta r}^{-\Delta r} g(r) dr$$

25

unabhängig von s ist, folgt:

$$SE(s) \propto \frac{1}{\frac{ds}{dx_w} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right)}$$

30

Berücksichtigt man die Kopplung von s und x_r , so folgt:

$$SE(x_r) \propto \frac{1}{\frac{dx_r}{dx_w}}$$

5

über den Quotienten

$$\frac{dx_r}{dx_w}$$

kann somit die Scanenergie direkt eingestellt werden, wobei x_r die x-Komponente eines Feldpunktes auf dem Bogen ist.

Aus einem vorgegebenen Verlauf der Scanenergie $SE(x_r)$ bzw. $SE(s)$ in der Retikelebene läßt sich mit diesen Formeln der azimutale Abbildungsmaßstab β_s berechnen.

15

$$SE(s) = c \cdot \frac{1}{\frac{ds}{dx_w} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right)}$$

20

$$\frac{ds}{dx_w} = c \cdot \frac{1}{SE(s) \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right)}$$

25

$$x_w = c' \cdot \int_0^s SE(s') \cdot \cos\left(\frac{s'}{R}\right) ds'$$

30

die Konstante c' erhält man aus der Randbedingung, daß der Wabenrand

x_w^{\max} auf den Feldrand s^{\max} abgebildet werden muß.

$s(x_w)$ ist folglich als Funktion von x_w bekannt:

5

$$\beta_s = \beta_s(x_w) = \frac{s(x_w)}{x_w}$$

Oben genannte Gleichung für β_s soll beispielhaft für konstante Scanenergie $SE(x_r)$ in der Retikelebene gelöst werden.

Für konstante Scanenergie SE^0 in der Retikelebene leitet sich der Abbildungsmaßstab wie folgt ab:

15

$$x_w = c' \cdot \int_0^s SE^0 \cdot \cos\left(\frac{s'}{R}\right) ds' = c'' \cdot \int_0^s \cos\left(\frac{s'}{R}\right) ds'$$

$$x_w = c'' \cdot \left[\sin\left(\frac{s'}{R}\right) \right]_0^s = c'' \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right), \text{ somit}$$

20

$$s = R \cdot a \sin\left(\frac{x_w}{c''}\right)$$

und damit:

25

$$\beta_s = R \cdot \frac{a \sin\left(\frac{x_w}{c''}\right)}{x_w}$$

Nachfolgend soll ein Beleuchtungssystem mit:

30

Wabe: $x_w \times y_w = 17.5 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$

Feld: $r \times s = 105 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$

$s (x_w = 8.75) = 52.5 \text{ mm}$

betrachtet werden. Hierfür ist:

5

$$c'' = 954.983 ,$$

somit

10

$$\beta_s = R \cdot \frac{\arcsin\left(\frac{x_w}{954.983}\right)}{x_w}$$

15

Generiert das Design der Feldlinse diesen Verlauf des azimuthalen Abbildungsmaßstabes, so ergibt sich für das beispielhaft oben definierte System in der Retikelebene eine konstante Scanenergie.

Bei der Variation des azimuthalen Abbildungsmaßstabes β_s gilt es für eine Anwendung in EUV-Lithographiesystemen zu berücksichtigen, daß die Feldlinse neben der Feldformung auch die Abbildung der sekundären Lichtquellen in die Eintrittspupille des Objektiv bestimmt. Dies, wie auch die geometrischen Randbedingungen, lassen eine beliebig große Verzeichnungskorrektur nicht zu.

25

Die zuvor beschriebene Uniformity-Korrektur ist nicht auf das beispielhaft beschriebene Beleuchtungssystem mit einer Feldwabenplatte beschränkt, sondern allgemein bei grazing incidence Feldspiegeln einsetzbar. Voraussetzung ist das Vorhandensein einer reellen oder virtuellen Ebene mit sekundären Lichtquellen bzw. eine Blendenebene. Insbesondere bei Köhlerschen Beleuchtungssystemen ist dies immer der Fall. Die oben

30

genannte reelle oder virtuelle Ebene wird in der Eintrittspupille des Objektivs abgebildet, wobei in der Pupillenebene dieser Abbildung - der Retikelebene - das Ringfeld erzeugt wird.

- 5 Nachfolgend sollen einige Ausführungsbeispiele von Beleuchtungssystemen angegeben werden, bei denen die Gleichmäßigkeit der Scanenergie durch eine erfindungsgemäß verzeichnete Abbildung der Feldlinse eingestellt wurde. Zunächst soll eine Anordnung umfassend eine Feldlinseneinheit mit zwei torischen Spiegeln ohne konische Konstanten betrachtet werden.

Ein besonderer Aspekt der Erfindung besteht darin, eine Asphärisierung der Oberflächen anzugeben, die zum einen eine gute Gleichmäßigkeit der Scanenergie gewährleistet und bei der andererseits die Telezentrie gegenüber der unverzeichneten Abbildung nicht wesentlich verschlechtert wird. Dabei sollen die Kippwinkel und Abstände der Spiegel konstant gehalten werden.

Die aufgeführten Ausführungsbeispiele werden anhand der folgenden Parameter dargestellt und verglichen::

20 -
$$Uniformity [\%] = 100 \% \cdot \frac{SE_{max} - SE_{min}}{SE_{max} + SE_{min}}$$

- maximaler Telezentriefehler übers Feld für die zentrale Wabe

25
$$\Delta i_{max} = [i_{ist} - i_{soll}]_{max} \text{ in } [mrad]$$

- geometrische Parameter von Feldspiegel 1: R_x, R_y, K_x, K_y
- geometrische Parameter von Feldspiegel 2: R_x, R_y, K_x, K_y

Für eine Feldlinse mit rein sphärischen x- und y-Querschnitten erhält man folgende Kenngrößen:

- Uniformity = 10.7 %
- $\Delta i_{\max} = 0.24 \text{ mrad}$
- Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$
- Feldspiegel 2: $R_x = -1494.60$, $R_y = -24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

In Figur 3 ist der Verlauf der Scanenergie über x in der Retikelebene als durchgezogene Linie aufgetragen. Die Scanenergie steigt zum Feldrand auf 124 % ausgehend von 100 % in der Feldmitte an. Die Berechnung berücksichtigt dabei nur die Abbildung der zentralen Wabe.

Dieser Zusammenhang bleibt jedoch auch für das Gesamtsystem erhalten, wie das in Figur 4 dargestellte Ergebnis für alle Feldwaben zeigt. Die durchgezogene Linie stellt die Scanenergie für torische Feldspiegel ohne konische Konstanten dar.

Aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse von Figur 3 und Figur 4 wird aus einem Vergleich der Kurven, die deckungsgleich sind, offensichtlich, daß folgende Näherungen in der numerischen Betrachtung möglich sind:

- Reduktion des Problems auf die Abbildung der zentralen Wabe.
- $\Delta r < R$: Abbruch der Taylor-Reihe nach der ersten Ordnung.

Nachfolgend sollen Systeme umfassend torische Feldspiegel vorgestellt werden, bei denen die konischen Konstanten freigegeben und die Feldlinsenspiegel nachoptimiert wurden, wobei ihr Kippwinkel und ihre Position beibehalten wurde.

1. Ausführungsbeispiel:

- Uniformity = 2.7 %
- $\Delta i_{\max} = 1.77 \text{ mrad}$
- Feldspiegel 1: $R_x = -275.24$, $R_y = -7347.29$, $K_x = -3.813$, $K_y = -385.81$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1067.99$, $R_y = 14032.71$, $K_x = -667.20$,
 $K_y = -25452.70$

5

Die gestrichelte Kurve in Figur 3 zeigt den vom Design für die zentrale Wabe her erwarteten Verlauf der Scanenergie, in Figur 4 ist die mit dem Gesamtsystem aller Waben erhaltene Scanenergie dargestellt..

Die notwendigen Pfeilhöhenkorrekturen an den beiden Feldspiegeln sind in den Abbildungen Figur 5 und Figur 6 als Höhenlinienplot dargestellt. Die Bereiche sind entsprechend der Ausleuchtung der Spiegel begrenzt. Die maximalen Pfeilhöhenkorrekturen liegen in der Größenordnung von $200 \mu\text{m}$.

15

Die sich für oben genanntes Ausführungsbeispiel ergebende Telezentrieverletzung von 1.77 mrad ist für ein Lithographiesystem nicht tragbar.

20

Nachfolgende Ausführungsbeispiele sind so ausgewählt, daß die Telezentrieverletzung in der Retikelebene maximal 1.0 mrad beträgt.

2. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, R_y^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}, R_x^{2.Sp}, R_y^{2.Sp}, K_x^{2.Sp}, K_y^{2.Sp}$$

25

- Uniformity = 4.6 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00 \text{ mrad}$
- Feldspiegel 1: $R_x = -282.72$, $R_y = -7691.08$, $K_x = -2.754$, $K_y = -474.838$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1253.83$, $R_y = 16826.99$, $K_x = -572.635$, $K_y = -$
 32783.857

30

3. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}, R_x^{2.Sp}, K_x^{2.Sp}, K_y^{2.Sp}$$

- 5
- Uniformity = 5.1 %
 - $\Delta i_{\max} = 1.00 \text{ mrad}$
 - Feldspiegel 1: $R_x = -285.23$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -2.426$, $K_y = -365.801$
 - Feldspiegel 2: $R_x = 1324.42$, $R_y = 24635.09$, $K_x = -568.266$, $K_y = -31621.360$

4. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}, R_x^{2.Sp}, K_x^{2.Sp}$$

- 15
- Uniformity = 5.1 %
 - $\Delta i_{\max} = 1.00 \text{ mrad}$
 - Feldspiegel 1: $R_x = -280.08$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -2.350$, $K_y = 0.0$
 - Feldspiegel 2: $R_x = 1181.53$, $R_y = 24635.09$, $K_x = -475.26$, $K_y = 0.0$

20

5. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}, K_x^{2.Sp}, K_y^{2.Sp}$$

- 25
- Uniformity = 6.0 %
 - $\Delta i_{\max} = 1.00 \text{ mrad}$
 - Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -2.069$, $K_y = -290.182$
 - Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = -503.171$, $K_y = -1494.602$

30

6. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$K_x^{1.Sp}, K_x^{2.Sp}$$

- Uniformity = 7.0 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -1.137$, $K_y = 0.0$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = -305.384$, $K_y = 0.0$

5

7. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, R_y^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}$$

- Uniformity = 7.8 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -288.65$, $R_y = -8466.58$, $K_x = -0.566$, $K_y = 139.337$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

15

8. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}$$

- Uniformity = 7.8 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -288.59$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -0.580$, $K_y = 111.346$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

20

9. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$$R_x^{1.Sp}, K_x^{1.Sp}$$

- Uniformity = 8.1 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -288.45$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -0.574$, $K_y = 0.0$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

30

10. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$K_x^{1.Sp}, K_y^{1.Sp}$

5

- Uniformity = 8.5 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -0.384$, $K_y = -290.182$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

11. Ausführungsbeispiel:

Freie Parameter

$K_x^{1.Sp}$

15

- Uniformity = 8.6 %
- $\Delta i_{\max} = 1.00$ mrad
- Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -0.367$, $K_y = 0.0$
- Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = 0.0$, $K_y = 0.0$

Die Ergebnisse für die verschiedenen Ausführungsbeispiele werden in nachfolgender Tabelle zusammengefaßt, wobei die freien Parameter mit einem Kreuz markiert sind:

20

$R_x^{1.Sp}$	$R_y^{1.Sp}$	$K_x^{1.Sp}$	$K_y^{1.Sp}$	$R_x^{2.Sp}$	$R_y^{2.Sp}$	$K_x^{2.Sp}$	$K_y^{2.Sp}$	Uniformity [%]	Δi [mrad]
ohne konische Konstanten								10.7	0.24
Variation Feldspiegel 1									
		X						8.6	1.0
		X	X					8.5	1.0
X		X						8.1	1.0
X		X	X					7.8	1.0

25

X	X	X	X					7.8	1.0
Variation Feldspiegel 1 + 2									
		X				X		7.0	1.0
		X	X			X	X	6.0	1.0
X		X		X		X		5.1	1.0
X		X	X	X		X	X	5.1	1.0
X	X	X	X	X	X	X	X	4.6	1.0

5

10

Hieraus ergibt sich, daß Feldspiegel 1 und Feldspiegel 2 nahezu zu gleichen Teilen die Scanenergie-Uniformity verbessern, wobei den Hauptanteil hierfür die x-Parameter tragen, die letztendlich den azimuthalen Abbildungsmaßstab β_s bestimmen.

15

Während bei den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen nur eine passive Korrektur der Gleichmäßigkeit untersucht wurde, bei der im wesentlichen nur die Oberfläche "verbogen" wurde, soll nachfolgend eine aktive Variante der Erfindung beschrieben werden. Die Betätigung kann hierbei mittels von mechanischen Stellgliedern erfolgen. Wie zuvor dargelegt, werden schon große Verbesserungen der Gleichmäßigkeit erzielt, wenn man nur die x-Parameter verändert. Variiert man zudem nur die konischen Konstanten in x-Richtung, so haben die Pfeilhöhendifferenzen über der gesamten Fläche das gleiche Vorzeichen. Die Abbildungen Figur 7 und Figur 8 zeigen die Pfeilhöhendifferenzen für das Ausführungsbeispiel 6. Hier wurden die konischen Konstanten in x-Richtung für die Feldspiegel 1 und 2 variiert. Die maximalen Pfeilhöhendifferenzen betragen 250 μm für den Feldspiegel 1 und 100 μm für den Feldspiegel 2. Die Uniformity verbessert sich dabei von 10.7 % auf 7.0 % bei einer Telezentrierverletzung von 1.0 mrad in der Retikelebene und 4.0 mrad in der Waferebene. Durch aktive Manipulation an der Feldlinse kann demnach die Uniformity der Scanenergie um ± 3.7 %

25

30

Für den Fall, daß nur die konischen Konstanten in x-Richtung variiert werden, sind die Pfeilhöhenänderungen fast nur von x abhängig.

Für die Pfeilhöhe pfh_{ref} der Referenzfläche gilt:

5

$$pfh_{ref}(x, y) = \frac{\varrho_x \cdot x^2 + \varrho_y \cdot y^2}{1 + \sqrt{1 - \varrho_x^2 x^2 - \varrho_y^2 y^2}}$$

Für die Pfeilhöhe pfh_{akt} der manipulierten Fläche gilt

$$pfh_{akt}(x, y) = \frac{\varrho_x \cdot x^2 + \varrho_y \cdot y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) \cdot \varrho_x^2 \cdot x^2 - (1 + k_y) \cdot \varrho_y^2 \cdot y^2}}$$

15

wobei $\varrho = 1/R$ die Krümmung ist.

Damit ergibt sich für die Pfeilhöhendifferenz Δpfh :

$$\Delta pfh(x, y) = pfh_{akt}(x, y) - pfh_{ref}(x, y)$$

20

Im Ausführungsbeispiel 6 sind:

Feldspiegel 1: $R_x = -290.18$, $R_y = -8391.89$, $K_x = -1.137$, $K_y = 0.0$

25

Feldspiegel 2: $R_x = 1494.60$, $R_y = 24635.09$, $K_x = -305.384$, $K_y = 0.0$.

Besonders bevorzugt sind die Aktuatoren bzw. mechanischen Stellglieder an den Spiegeln auf Äquipotentiallinien 20 (Orte gleicher Pfeilhöhendifferenz) angeordnet. Diese Reihen gleicher Aktuatoren verlaufen in zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel nahezu parallel zur y-Achse. Bei einer derartigen Ausführungsform ist es daher nicht erforderlich, ein

30

zweidimensionales Feld von Aktuatoren anzusteuern, sondern ausreichend, nur eine Zeile von verschiedenen Aktuator-Reihen anzusteuern.

5 Auf Feldspiegel 2 kann man sich zum Beispiel eine Anordnung der Aktuatorzeilen wie in Figur 9 dargestellt vorstellen. Eine technische Realisierung bestünde in der Ausbildung der gesamten Aktuatorzeile als Aktuatorbalken. Wird der Balken betätigt, so wird die gesamte Aktuatorzeile angehoben bzw. abgesenkt.

10 Eine aktive Korrektur der Gleichmäßigkeit mit Hilfe der zuvor beschriebenen Aktuatoren kann wie folgt vorgenommen werden:

Der Verlauf der Scanenergie $SE_{Des}(x_r)$ in der Retikelebene ist aufgrund des geometrischen Designs der Feldlinse festgelegt.

15

Nun wird die Scanenergie $SE_w(x_w)$ in der Waferebene gemessen, wobei in diesem Ergebnis alle Schicht-, Absorptions- und Vignettierungseffekte enthalten sind.

20

Für den Lithographieprozeß muß $SE_w(x_w)$ unabhängig von x_w sein. Falls dies nicht der Fall ist, muß der x_w -abhängige Offset durch das Beleuchtungssystem vorgehalten werden.

25

Da es sich bei der Abbildung von Retikel- zu Waferebene um eine nahezu ideale Abbildung handelt, kann $SE_w(x_w)$ direkt in die Retikelebene $SE_w(x_r)$ umgerechnet werden.

Normiert man die Designvorgabe $SE_{Des}(x_r)$ und die gemessene Verteilung $SE_w(x_r)$ für $x_r = 0.0$ auf 100 %, so beträgt die Sollvorgabe

30

$$SE_{Des}^{akt}(x_r) [\%] = SE_{Des}(x_r) - SE_w(x_r).$$

$SE_{Des}^{akt}(x_r)$ bestimmt den azimuthalen Abbildungsmaßstab β_s und daraus wiederum die notwendigen Korrekturen für die Feldlinse.

5 Besteht eine Differenz zwischen Soll- und/Istwert, so können beispielsweise zeitabhängige bzw. settingabhängige Abweichungen in gewissen Grenzen mit den zuvor beschriebenen Aktuatoren korrigiert werden. Mit einer manipulierbaren Feldlinse lassen sich bis zu ± 2.5 % Uniformity, mit zwei manipulierbaren Feldlinsen bis zu ± 5.0 % Uniformity korrigieren.

Bei statischen Abweichungen wie z.B. Abweichungen aufgrund von Schichten, Absorptionen, etc. können diese in einem geänderten Feldlinsendesign berücksichtigt werden; eine Korrektur mit Aktuatoren ist dann nicht erforderlich.

15

Durch die Erfindung wird erstmals eine verlustfreie Kontrolle der Scanenergie erreicht, wobei der feldabhängige Scanweg die Schicht-, Absorptions- und Vignettierungseffekte im statischen Design der Feldlinse berücksichtigen kann. Darüber hinaus schlägt die Erfindung eine dynamische Steuerung mit aktiven Feldspiegeln für zeitabhängige bzw. settingabhängige Effekte vor. Läßt man einen Telezentriefehler von ± 4.0 mrad in der Waferebene zu, so kann die Uniformity-Korrektur bis zu ± 5 % betragen.

20

Patentansprüche

5

1. Beleuchtungssystem für die Scanning-Lithographie mit Wellenlängen \leq 193 nm, insbesondere die EUV-Lithographie, zur Ausleuchtung eines Schlitzes, umfassend

1.1 eine Lichtquelle

1.2 mindestens einen Feldspiegel oder eine Feldlinse
dadurch gekennzeichnet, daß

1.3 der/die Feldspiegel oder die Feldlinse(n) derart geformt sind, daß das beleuchtete Feld in der Retikelebene senkrecht zur Scanrichtung verzeichnet ist.

15

2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß optische Komponenten zur Transformierung der Lichtquelle(n) in sekundäre Lichtquelle(n) vorgesehen sind.

3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Komponenten zur Transformation mindestens einen Spiegel umfassen, der in Rasterelemente gegliedert ist.

20

4. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente Feldwaben sind.

25

5. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Beleuchtungssystem einen weiteren Spiegel mit Rasterelementen aufweist, der in der Ebene der sekundären Lichtquellen angeordnet ist.

30

6. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß

der Feldspiegel oder die Feldlinse derart geformt sind, daß die sekundären Lichtquellen in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems bzw. Eintrittspupille des Objektives abgebildet werden.

5

7. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß
- der Feldspiegel oder die Feldlinse derart geformt sind, daß mit Hilfe des/der Feldspiegel oder der Feldlinse(n) eine vorgegebene Intensitätsverteilung und/oder Telezentrie und/oder Formung des auszuleuchtenden Feldes erreicht werden.

15

8. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß
- das Beleuchtungssystem ein Ringfeldsystem mit gebogenem Schlitz ist und die statische Beleuchtungsintensität im gebogenen Schlitz azimuthal abnimmt.

20

9. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß
- das Beleuchtungssystem ein Ringfeldsystem mit gebogenem Schlitz ist und die Beleuchtungsintensität im gebogenen Schlitz azimuthal zunimmt.

25

10. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß
- die Uniformität der Scanenergie in der Retikelebene im Bereich $100 \pm 7 \%$, bevorzugt $100 \pm 5 \%$, besonders bevorzugt $100 \pm 3 \%$ liegt.

11. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Feld- bzw. die Feldspiegel toroidförmig ausgebildet sind.
- 5 12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die azimutale Verzeichnung durch Änderung der Flächenparameter des bzw. der toroidförmigen Feldspiegel senkrecht zur Scanrichtung erreicht wird.
- 10 13. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die azimutale Verzeichnung durch Änderung der Flächenparameter des bzw. der toroidförmigen Feldspiegel parallel und senkrecht zur Scanrichtung erreicht wird.
- 15 14. Beleuchtungssystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der bzw. die Feldspiegel Aktuatoren zur aktiven Beeinflussung der Spiegeloberfläche und damit der Verzeichnung umfassen.
- 20 15. Beleuchtungssystem nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Aktuatoren in Reihen parallel zur Scan-Richtung des Feldspiegels angeordnet sind.
- 25 16. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Telezentriefehler der Feldlinse (n) höchstens ± 4.0 mrad, vorzugsweise ± 1.0 mrad in der Retikelebene beträgt.
- 30 17. EUV-Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie,
17.1 mit einer Maske auf einem Trägersystem,

- 17.2 einem Projektionsobjektiv,
17.3 einem lichtempfindlichen Objekt auf einem Trägersystem,
dadurch gekennzeichnet, daß
17.4 die EUV-Projektionsbelichtungsanlage ein Beleuchtungssystem gemäß
5 einem der Ansprüche 1 bis 15 umfaßt.

18. Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 17, dadurch
gekennzeichnet, daß
das Beleuchtungssystem hinsichtlich
- Geometrie des beleuchtenden Feldes auf der Maske
- numerischer Apertur
- Pupillenlage
an das Projektionsobjektiv angepaßt ist.

- 15 19. EUV-Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 17 oder 18, dadurch
gekennzeichnet, daß dieses als Scanning-System ausgeführt ist.

20. Verfahren zur statischen Korrektur der Scanenergie in einer EUV-
Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem der Ansprüche 16 bis 18,
umfassend folgende Schritte:
20.1 es wird eine vorbestimmte Gleichmäßigkeit der Scanenergie im zu
beleuchtenden Schlitz vorgegeben.
20.2 es wird die Form der Feldlinse ermittelt, bei der durch den Verlauf des
azumitalen Abbildungsmaßstabes β_s die vorbestimmte Gleichmäßigkeit
25 erreicht wird.

21. Verfahren zur dynamischen Korrektur der Scanenergie in einem EUV-
Projektionssystem gemäß einem der Ansprüche 15 bis 17, umfassend
die folgenden Schritte:

- 30 21.1 die Scanenergie $SE_w(x_w)$ in der Waferebene wird gemessen

- 21.2 die gemessene Scanenergie $SE_w(x_w)$ wird mit einer vorgegebenen $SE_{VORGABE}(x_w)$ Scanenergie verglichen
- 21.3 bei Abweichung werden die entsprechenden Aktuatoren des Feldspiegels betätigt, bis $SE_w(x_w)$ dem vorgegebenen Wert $SE_{VORGABE}(x_w)$ entspricht, so daß eine vorbestimmte Gleichmäßigkeit erreicht wird.

Beleuchtungssystem mit Feldspiegeln zur Erzielung einer gleichförmigen
Scanenergie entlang eines beliebigen Belichtungsweges

Zusammenfassung

5

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem für die Scanning-Lithographie mit Wellenlängen ≤ 193 nm, insbesondere die EUV-Lithographie, zur Ausleuchtung eines Schlitzes, umfassend eine Lichtquelle
mindestens einen Feldspiegel oder eine Feldlinse.

Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß der/die Feldspiegel oder die Feldlinse(n) derart geformt sind, daß das beleuchtete Feld in der Retikelebene senkrecht zur Scanrichtung verzeichnet ist.

15

FIG. 2

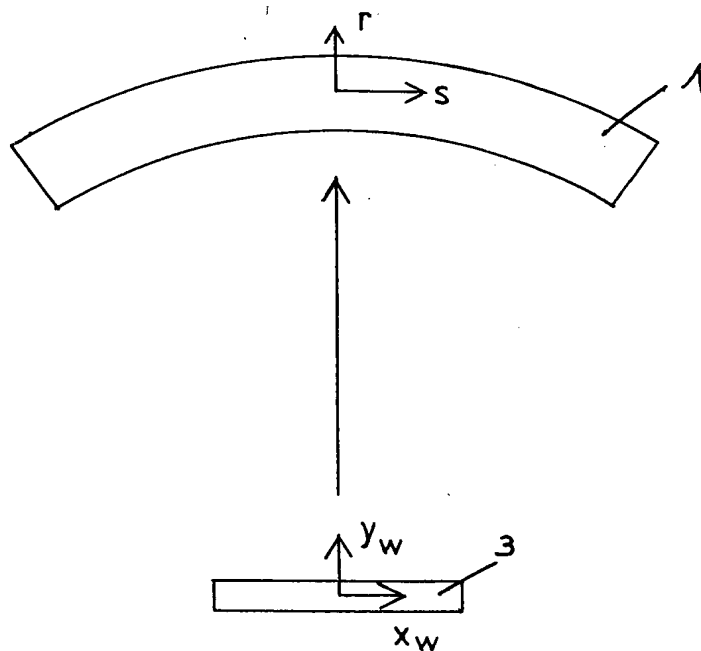


FIG. 1

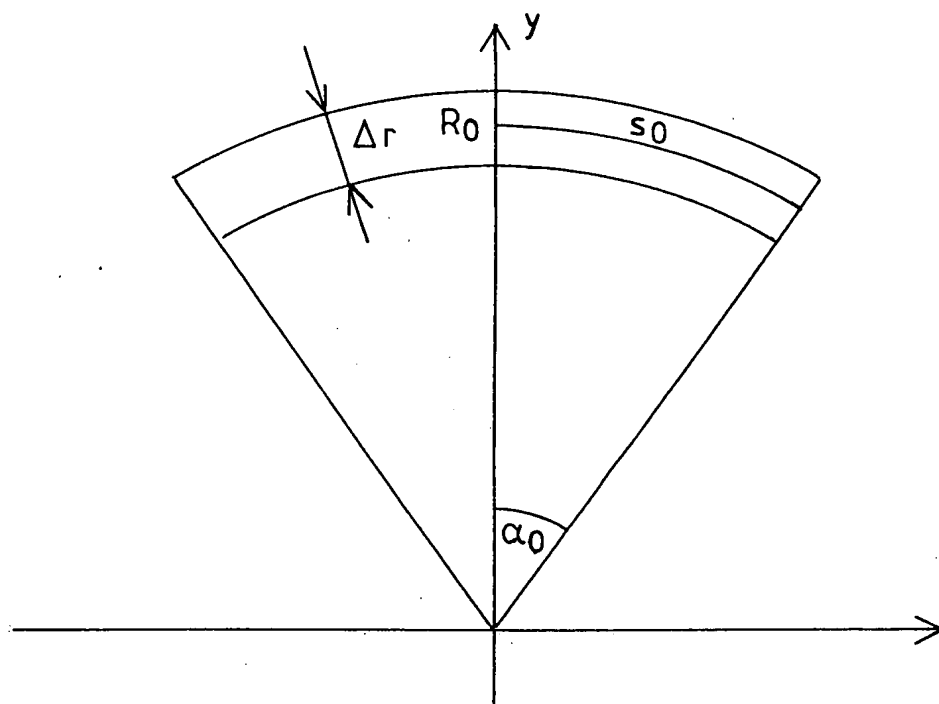


FIG. 3

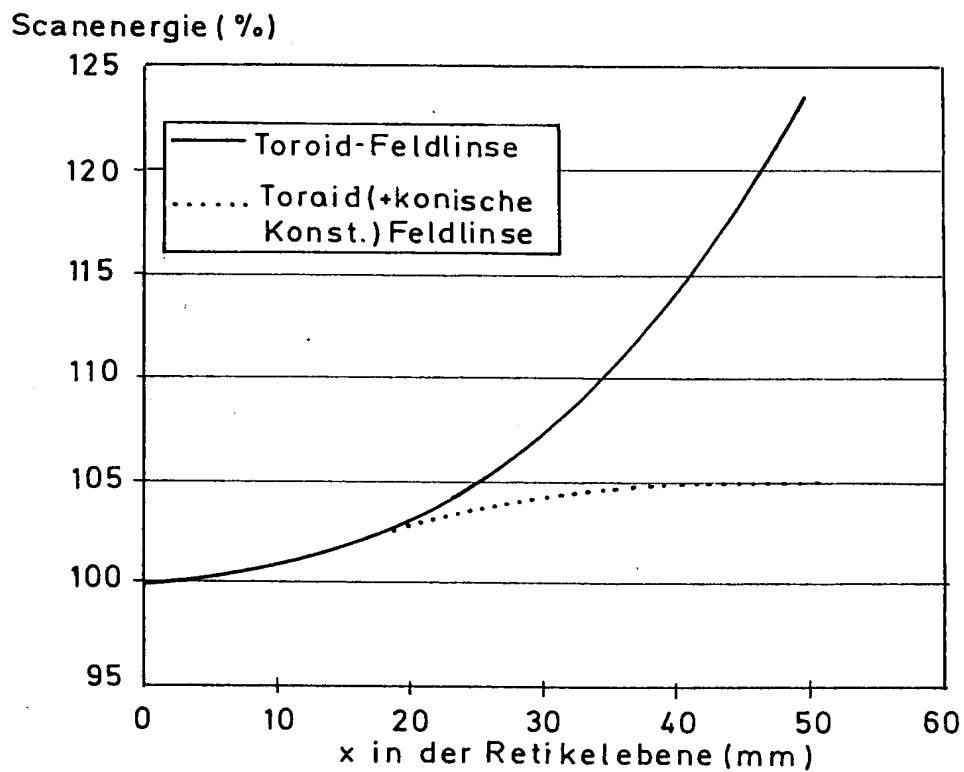


FIG. 4

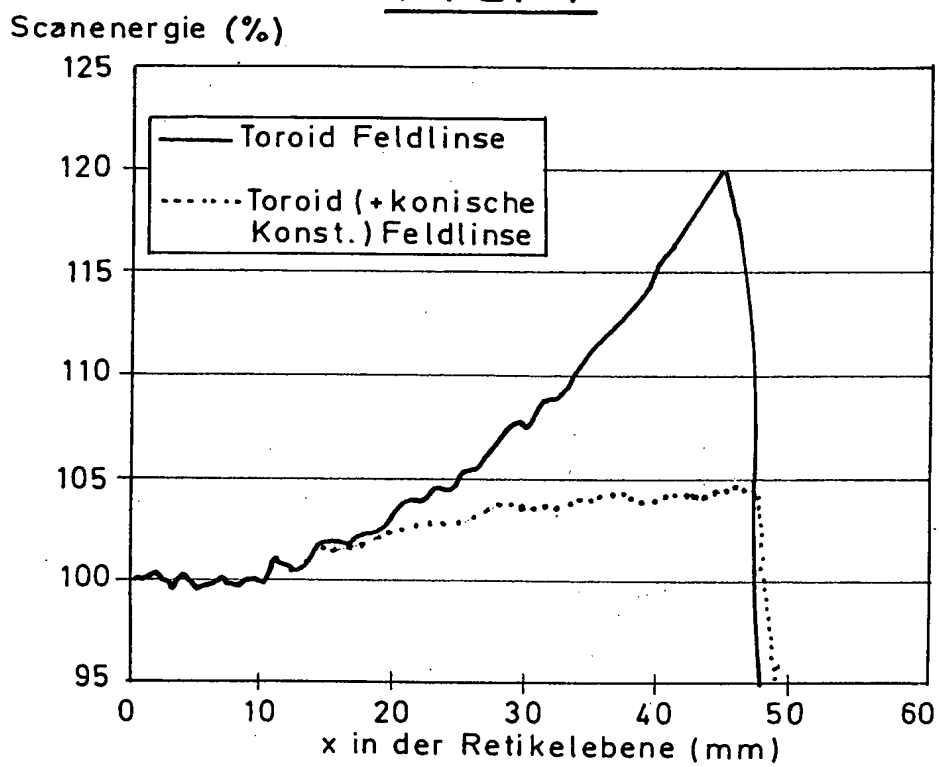


FIG. 5

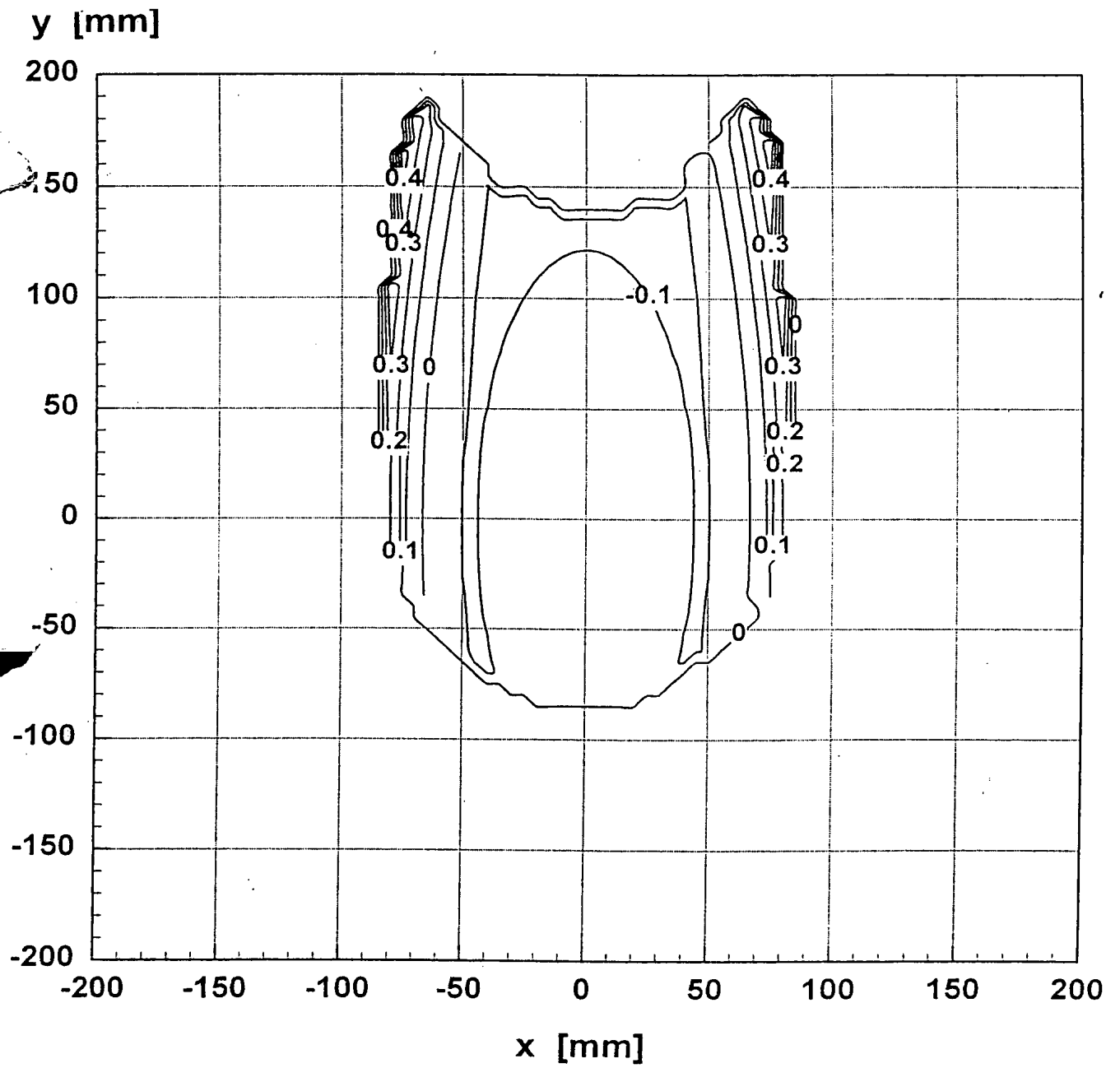


FIG. 6

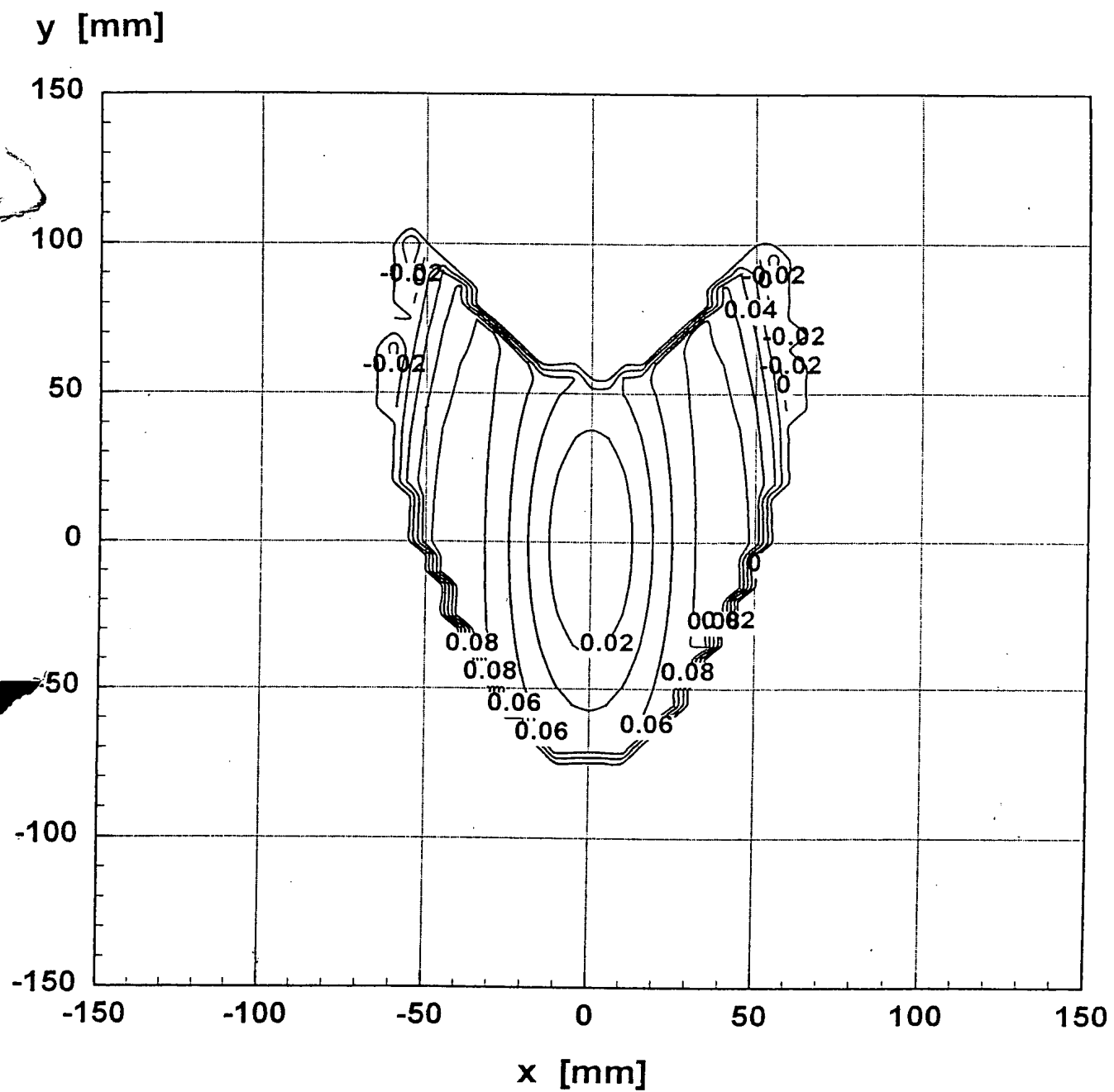


FIG. 7

y [mm]

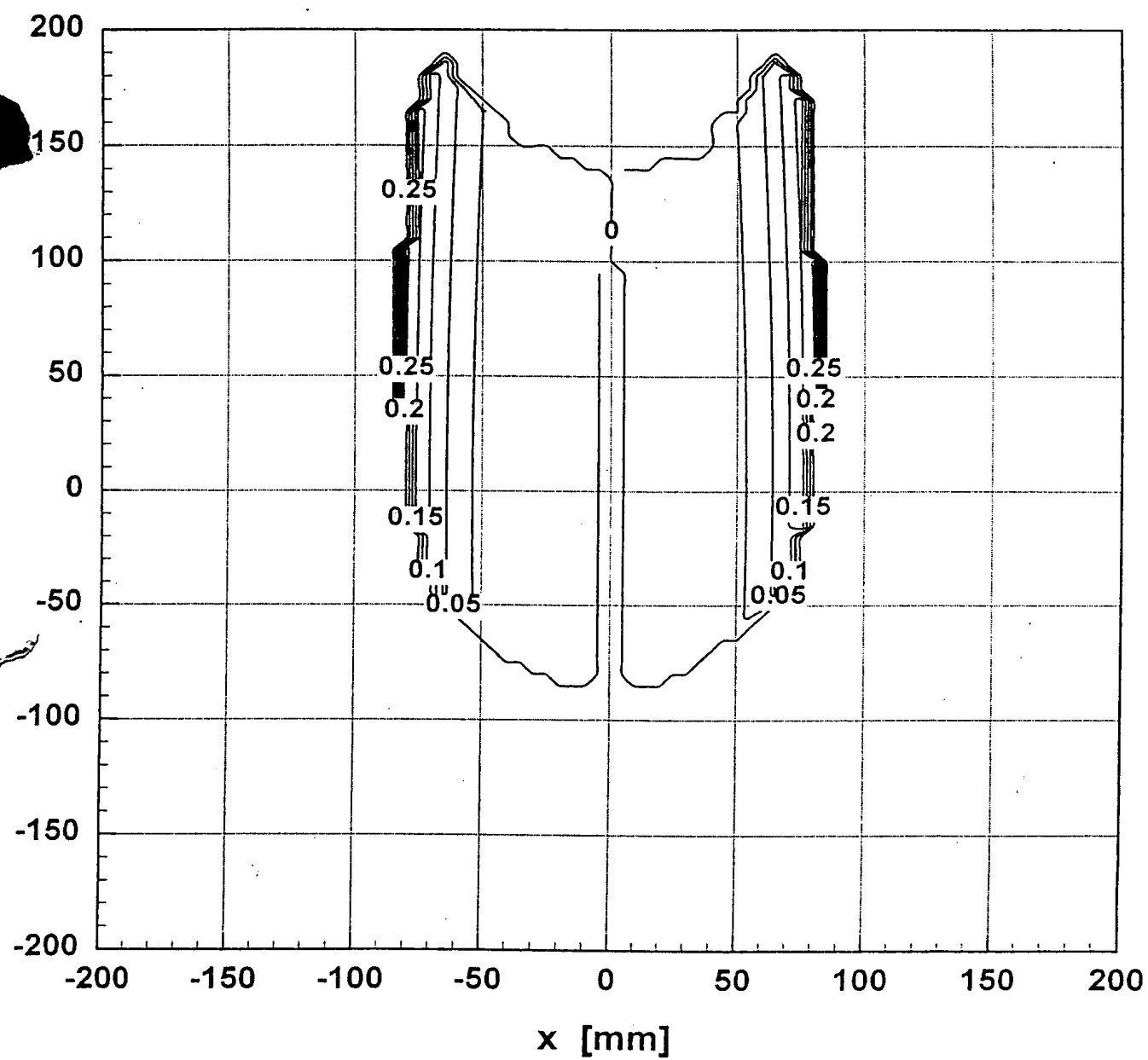


FIG. 8

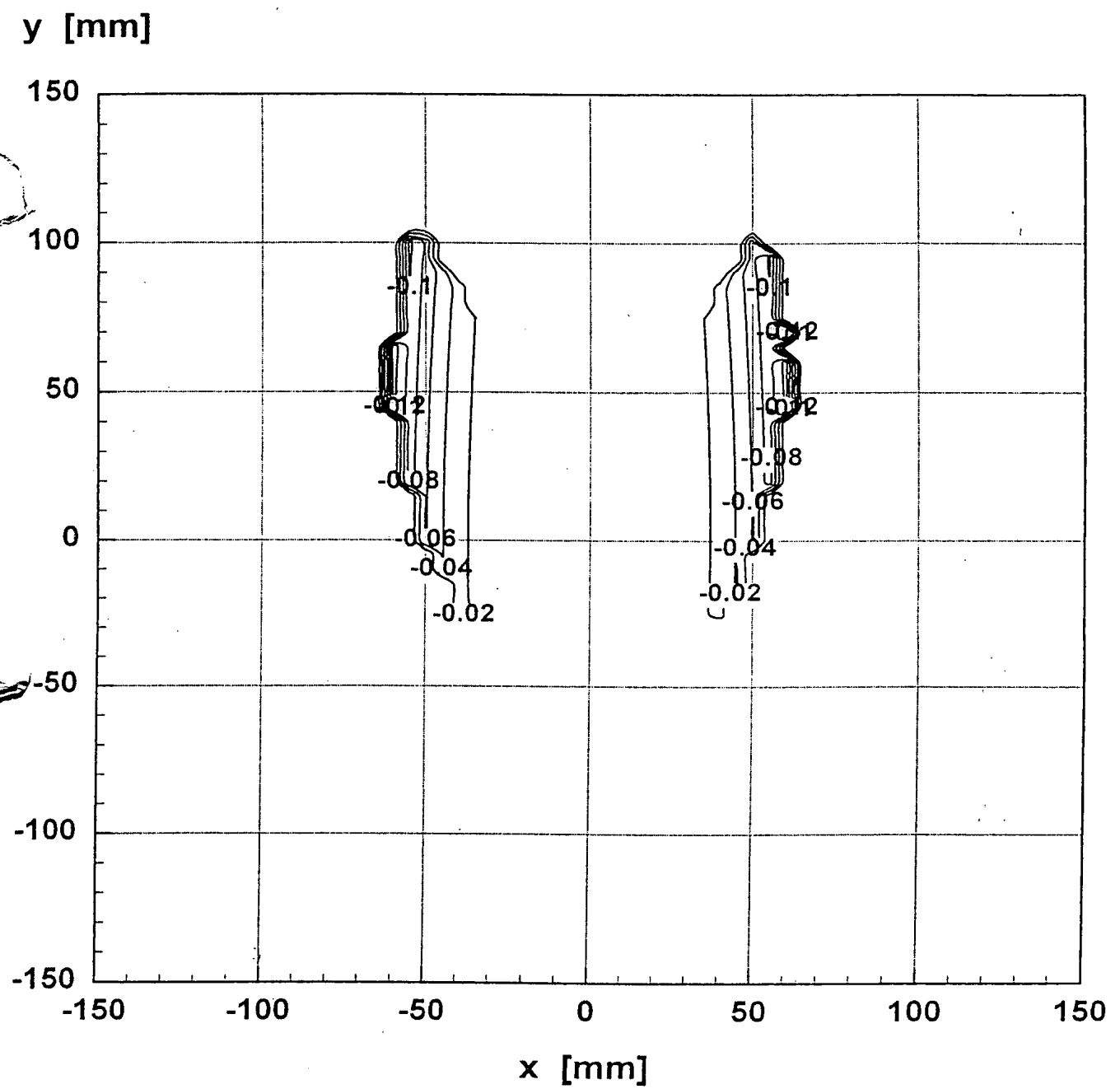


FIG. 9

